EFECTO DEL ENCALADO SOBRE PROPIEDADES FÍSICAS DE UN SUELO DE LA PRADERA PAMPEANA. ASOCIACIÓN CON PROPIEDADES QUÍMICAS

MABEL VÁZQUEZ[1]; ANTONINO TERMINIELLO[1]; ANDRÉS DUHOUR[2];
MIRTA GARCÍA[1] & FACUNDO GUILINO[1]

[1] Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales. Universidad Nacional de La Plata. Av. 60 y 119, La Plata (1900). CC31. Buenos Aires, Argentina.
[2] Departamento de Ciencias Básicas. Universidad Nacional de Lujan. Cruce rutas 5 y 7. Luján (6700). Buenos Aires, Argentina.

Recibido: 15-02-08
Aceptado: 22-04-09

RESUMEN
La acidificación edáfica puede disminuir la disponibilidad de nutrientes, así como afectar cualidades físicas. Su tratamiento mediante el agregado de enmiendas cálcicas/ cálcico-magnésicas, podría mejorar propiedades físicas tanto estacionarias como dinámicas, en consecuencia a cambios de naturaleza química. El objetivo del trabajo es evaluar la incidencia del agregado de diferentes tipos/dosis de correctores, sobre resistencia a la penetración, densidad aparente, cantidad y distribución de tamaño de poros, dimensión fractal, infiltración y escurrimiento de un Argiudol Típico de la Pradera Pampeana argentina, así como su asociación con variables químicas. Se realizó un ensayo diseño completamente al azar con arreglo factorial (3 r) con parcelas de 50 m^2. Tratamientos: 0, 1.000, 1.500 y 2.000 kg ha^{-1} de conchilla y dolomita. Estos se aplicaron al voleo e incorporaron en 2002 y en 2005. El agregado de enmiendas modificó la resistencia a la penetración en forma variable según dosis/profundidad de evaluación. La dosis de 1.000 kg ha^{-1} redujo dicha resistencia respecto del testigo y dosis superiores (1.500 y 2.000 kg ha^{-1}) hasta los 30 cm. Dosis medias de ambos correctores aumentaron la estabilidad de los agregados al agua. La dosis de 2.000 kg ha^{-1} de dolomita incrementó respecto del testigo la frecuencia de poros de mayor tamaño, con geometrías comparables, de 10-20 cm de profundidad. La dolomita (1.000 kg ha^{-1}) aumentó la infiltración y redujo el escurrimiento respecto del testigo, reduciendo las posibilidades de erosión. Los cambios en las propiedades evaluadas estarían asociados al aumento de la capacidad de intercambio catiónico y el contenido de Ca y Mg intercambiables, a causa del incremento de pH y su incidencia en las cargas variables. El agregado de dolomita no modificó la densidad aparente ni la dimensión fractal. Estos cambios estuvieron acompañados por un incremento en la capacidad de intercambio catiónica y el Ca intercambiable.

Palabras clave. Resistencia mecánica, estabilidad estructural, densidad aparente, infiltración, porosidad, dimensión fractal.

EFFECT OF LIME ON THE PHYSICAL PROPERTIES OF A SOIL OF THE PAMPEAN PRAIRIE

ABSTRACT
The edaphic acidification can diminish nutrients availability, as well as affect physical properties. Its treatment by means of calcic/calcic- magnesic amendments, could improve stationary and dynamic physical properties, consequently to changes of chemical nature. The aim of this work was to evaluate the incidence of different amendment type/doses, on the penetration resistance, bulk density, amount and distribution of pore sizes o, fractal dimension, infiltration and draining of a Typical Argiudol type of the Argentine Pampean Prairie, as well as its association with chemical variables. For it a trial was made with a randomized design (3 r), with parcels of 50 m2. Treatments: 0, 1,000, 1,500 and 2,000 kg ha^{-1} of shell and dolomite. They were applied in cover and incorporated in 2002 and 2005. The aggregate of amendments modified the penetration resistance in variable form according to dose and evaluation depth . The doses of 1,000 kg ha^{-1} reduced to this resistance respect the control and higher doses (1,500 and 2,000 kg hs^{-1}) until 30 cm. Medium doses of both correctors increased the aggregates water stability. The dose of 2,000 kg ha^{-1} of dolomite increased, in relation to the control the pore frequency of greater size, with comparable geometries, at 10-20 cm of depth. The dolomite (1,000 kg ha^{-1}) increased the infiltration and reduced the draining in relation to the control, reducing the erosion possibilities. The dolomite aggregate did not modify the bulk density nor the fractal dimension. These changes were accompanied by an increase in the cation exchange capacity and the interchangeable Ca.

Key words. Mechanical resistance, structural stability, bulk density, infiltration, porosity, fractal dimension.

INTRODUCCIÓN

La acidificación de los suelos responde a variadas causas naturales y antrópicas, entre ellas el lavado de bases y su exportación por la producción agrícola y pecuaria (Vázquez, 2005). Este fenómeno puede derivar en la disminución de la reserva de los nutrientes básicos y su desbalance, la alteración de la dinámica de otros nutrientes (como el N, P y Mo), así como la afectación de propiedades físicas estacionarias y dinámicas, entre otras consecuencias.

La estabilidad estructural es el resultado de complejas interacciones entre procesos biológicos, químicos y físicos (Tisdall & Oades, 1982). La complejidad de los procesos depende de factores abióticos, como la mineralogía y el complejo de cambio; bióticos, como el tipo/contenido de materia orgánica y la actividad microbiana, así como factores ambientales, como la humedad y temperatura (Chen *et al.,* 1998). Se ha demostrado que el encalado puede afectar la estabilidad estructural tanto en sentido positivo como negativo, en este último caso, por ejemplo, por propiciar mayor actividad microbiana y con ello la mineralización de la materia orgánica lábil, responsable de la unión de macroagregados (Baldock *et al*., 1994; Roth & Pavan, 1991). Otra causa de la disminución de la estabilidad estructural podría ser la dispersión de arcillas en suelos con predominio de carga variable positiva dada su acidez, a causa del aumento de pH y consecuente disminución de las mencionadas cargas (Alburquerque *et al*., 2003). Los efectos positivos y negativos pueden acontecer incluso en un mismo suelo en escalas de tiempo distintas, como resultantes de cambios en la materia orgánica, por un lado, y el poder estructurante de los cationes divalentes agregados, por el otro (Chan & Heenan, 1998). No sólo la cantidad de cationes divalentes es modificada por el encalado, sino también la relación catiónica mono-di-trivalente del equilibrio solución interna-externa, dada la afectación que la práctica produce sobre la capacidad de intercambio catiónica, a través de las cargas variables (Blake *et al.,* 1999; Vázquez *et al.,* 2005). Alteraciones estructurales podrían redundar en modificaciones del sistema poroso, la dinámica del agua y la resistencia mecánica del suelo. El sistema poroso del suelo posee una distribución interna no uniforme, por lo tanto, los cambios en la heterogeneidad y forma del conjunto pueden ser evaluados mediante su dimensión fractal (Anderson *et al.,* 1998). Tales modificaciones podrían tener connotaciones particulares en suelos del ámbito templado argentino.

Se plantea como hipótesis de trabajo que el agregado de enmiendas cálcicas y cálcico-magnésicas, en suelos acidificados de la Pradera Pampeana, incide sobre sus propiedades físicas estacionarias y dinámicas, en forma variable de acuerdo al tipo y dosis de producto agregado, a través de cambios en propiedades químicas.

El objetivo del presente trabajo es evaluar la incidencia del agregado de diferentes dosis de conchilla y dolomita, sobre la resistencia a la penetración, densidad aparente, cantidad y distribución de tamaño de poros, dimensión fractal, infiltración y escurrimiento de un suelo Argiudol Típico de la Pradera Pampeana argentina, así como su asociación con variables químicas.

MATERIALES Y MÉTODOS

Características del sitio de ensayo: el trabajo fue realizado en la localidad de Los Hornos, Pdo. de La Plata, provincia de Buenos Aires. La región posee clima subhúmedo con 1.000 mm de precipitación anual y régimen mesotérmico, con una temperatura media anual de 17 ºC. Se trata de un suelo desarrollado sobre material loésico, de tipo Argiudol Típico, Familia arcillosa fina illítica térmica, pH actual 5,1 y capacidad de intercambio catiónico (CIC) de 14,3 $cmol_c\ kg^{-1}$. Los datos analíticos pueden verse en la Tabla 1 (Lanfranco, 1980).

Tabla 1. Características generales del suelo ensayado (Lanfranco, 1980).
Table 1. General characteristics of trial soil (Lanfranco, 1980).

Horizonte	Ap	A	2 B_{t1}	2B_{t2}	3BC_1	3BC_2	3BC_3	3C
prof. (cm)	0-14	14-25	25-40	40-70	70-110	110-165	165-190	190-+200
Ct ($mg\ g^{-1}$)	13,9	8,7						
Nt ($mg\ g^{-1}$)	1,68	1,05						
Arcilla (%)	20,7	20,7	48,9	49	48,6	31	20,5	22,34
Limo (%)	50,4	51,9	39,4	37	31,3	49	52,8	53,4
Arena (%)	28,9	27,4	11,5	13,2	19,8	20,1	21	24,2
Clase textural	frL-fr	frL-fr	a-aL	a	a	fra-fraL	frL	frL
pH actual	5,6	5,6	6	6,2	6,5	6,5	6,2	6,4
Cationes int.								
Ca ($cmol_c\ kg^{-1}$)	12,4	11,3	21	28,2	22	19,3	17,3	
Mg ($cmol_c\ kg^{-1}$)	2,2	2,1	3,9	5,8	4,2	5,1	4,9	
Na ($cmol_c\ kg^{-1}$)	0,1	0,1	1	0,9	1	0,4	0,4	
K ($cmol_c\ kg^{-1}$)	1,9	1,6	1,9	1,9	2	1,6	1,6	
CIC($cmol_c\ kg^{-1}$)	17	16,6	29,2	37	30,3	28	25	25,5

Diseño experimental: completamente al azar con 3 repeticiones y arreglo factorial, donde los factores son dosis y tipo de corrector. Las parcelas fueron de 50 m^2 de superficie y sembradas con alfalfa (*Medicago sativa L*). Los tratamientos consistieron en la aplicación de 0 (T), 1.000, 1.500 y 2.000 kg ha^{-1} de conchilla ($CaCO_3$ 96%, en adelante C10; C15 y C20) y dolomita ($CaCO_3.MgCO_3$ 52 y 45,5% respectivamente, en adelante D10; D15; D20). Los correctores se aplicaron al voleo y se incorporaron con rastra de discos en 2002 y en el 2005 sobre las mismas parcelas.

Determinación de variables químicas: todas las determinaciones químicas se realizaron mediante metodología estandarizada en la Argentina (SAMLA) (SAGPyA, 2004) 2 años a posteriori de la primera aplicación de correctores. Para ello el suelo fue muestreado de 0-20, 20-40 y 40-60 cm de profundidad, mediante muestra compuesta (4 submuestras/parcela para cada profundidad). Se determinó:

1. pH actual (suelo: agua 1:2,5), determinación potenciométrica.
2. CIC: extracción: por el método de acetato de amonio de NH_4^+ 1 M pH 7. Determinación por destilación Kjehldal.
3. Ca y Mg intercambiables: extracción: por el método de acetato de amonio de NH_4^+ 1 M pH 7. Determinación por complejometría con EDTA.

Determinación de variables físicas: fueron realizadas a posteriori de la 2º aplicación de los correctores, se determinó:

1. resistencia a la penetración con un penetrómetro de cono electrónico RIMIX CP20, construido bajo norma ASAE S312.2, con definición de profundidad por ultrasonido con 15 repeticiones sobre cada parcela. A partir de estos datos se obtuvo el valor del índice de cono (IC) cada 10 cm del perfil analizado. A los fines de evaluar la resistencia, se determinó humedad gravimétrica en los sitios de muestreo, tomada a intervalos de 10 cm y hasta los 50 cm del perfil (Barone & Faugno, 1996).
2. densidad aparente evaluada para los tratamientos T; D10 y D20 por medio del método del cilindro, mediante 3 repeticiones en cada parcela. (Blake & Hartge, 1986).
3. infiltración y escurrimiento con microsimulador de lluvia (Irurtia & Mon, 1994), con láminas de 60 mm h^{-1} y mediciones cada 10 minutos, para los tratamientos T, D10 y D20, mediante 2 repeticiones por parcela.
4. estabilidad estructural a través del método del alcohol:agua a 2 profundidades, 0-10 cm y 10- 20 cm, sobre 2 muestras de suelo para cada tratamiento, parcela y profundidad, a partir de las cuales se prepararon 4 agregados de 6-8 mm de diámetro/muestra. Los agregados se sumergieron en soluciones alcohol:agua (50, 60, 70, 80, 90 y 100% de agua), considerando el parámetro de medición la concentración de agua cuando 3 de los 4 agregados se desintegraban (Tallarico, 1974).
5. porosidad sobre muestras sin disturbar extraídas mediante caja de Kubiëna en los tratamientos T y D20, de 0-10 y 10-20 cm de profundidad. Las mismas se secaron al aire e impregnaron con resina poliéster con colorante fluorescente (Fitzpatrick, 1984; Duhour *et al.,* 2004). Los bloques obtenidos se cortaron y pulieron en 2 caras perpendiculares a la superficie. Dichas superficies fueron fotografiadas con cámara digital y las fotos se procesaron para obtener imágenes en blanco y negro de los poros y la matriz sólida (Duhour *et al.,* 2004). En secciones de 500 pixels de lado se evaluó el área y perímetro de los poros, con los que se calculó el coeficiente de forma (F) como sigue:

$$F = \frac{4\,\pi\,\text{área}}{\text{perímetro}^{2}}$$

Se realizó el histograma de frecuencias de tamaño de poros, se los clasificó en elongados (F<0,2), irregulares (0,2<F<0,5) y redondeados (F>0,5) (Posadas *et al.,* 2005) y se calculó el porcentaje de poros de cada categoría para cada imagen. La porosidad de la muestra se estimó como el porcentaje de la superficie de la imagen ocupada por poros (PI).

La dimensión fractal (D) se obtuvo por el método de 'box-counting' (Duhour *et al*., 2004) mediante el 'plugin' Fraclac© del programa ImageJ©.

Análisis estadístico: análisis paramétrico de la varianza, comparación de medias por el Test de LSD o Tukey, indicado en cada caso, comparación de medias apareadas, regresiones logarítmicas, comparación de coeficientes de regresión. Se realizaron histogramas de frecuencias de tamaño de poros a partir de las imágenes, para cada tratamiento y profundidad, los que se compararon mediante test de X^2 (Mendenhall, 1986).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

De acuerdo a los resultados de la Tabla 2, se aprecia que la aplicación de correctores produjo diferencia estadísticamente significativa (p <0,05) en la variable resistencia a la penetración. Puede generalizarse que, para el intervalo de profundidad entre la superficie y los 30 cm, C10 y D10 manifestaron menores resistencias que T y que las mayores dosis de los mismos correctores (C20, D20). Las dosis medias (C15 y D15) alcanzaron valores similares a T y a las mayores dosis. Para la capa de 0-10 cm, los tratamientos C10 y D10 redujeron los valores de impedancia mecánica en aproximadamente un 20% con respecto a T. No habiéndose encontrado diferencia estadísticamente significativas (p<0,05) en la variable humedad gravimétrica en la mayor parte de los casos, o ser esta mayor en los tratamientos de mayor resistencia mecánica. Podría hipotetizarse que las diferencias en la resistencia comentadas, pueden ser atribuidas a la acción de los productos correctores sobre la estructura del suelo. Magra & Ausilio (2004) afirman que los suelos de ámbitos templados, con acidez elevada, presentan menor agregación, disminuyendo la permeabilidad y la aireación, debido a que los cationes divalentes actúan por puentes catiónicos como vínculo entre cristales de arcilla, entre éstos y la ma-

Tabla 2. Resistencia a la penetración y humedad gravimétrica al momento de su evaluación, según tratamientos y profundidades.
Table 2. Penetration resistance and gravimetric moisture at its evaluation time, according to treatment and depth.

	Profundidad (cm)							
	0-10		10-20		20-30		30-40	
	RP[1] (MPa)	H[2] (%)	RP (MPa)	H (%)	RP (MPa)	H (%)	RP (MPa)	H (%)
Testigo	1,68 cd	21,4 abc	2,93 bc	23,0 a	3,54 bc	27,3 a	3,65 ab	26,9 a
D10	1,33 a	18,4 a	2,55 a	23,3 a	3,27 a	26,4 a	3,45 a	27,6 a
D15	1,51 bc	20,5 ab	2,93 bc	23,2 a	3,58 c	25,0 a	3,80 b	27,9 a
D20	1,88 e	24,1 bc	3,11 c	23,7 a	3,71c	25,9 a	3,42 a	30,1 a
C10	1,36 ab	22,2 abc	2,55 a	22,7 a	3,29 a	26,5 a	3,50 a	30,0 a
C15	1,63 cd	21,3 abc	2,76 b	22,7 a	3,40 ab	28,9 a	3,53 a	28,5 a
C20	1,71 de	25,5 c	2,88 b	20,0 a	3,71 c	29,6 a	3,83 b	30,4 a

[1] RP (resistencia a la penetración); [2] H (humedad gravimétrica); 0 (T); D10, D15, D20 (1.000, 1.500 y 2.000 kg ha^{-1} de dolomita), C10, C15, C20 (1.000, 1.500 y 2.000 kg ha^{-1} de conchilla). Valores en columnas seguidos de igual letra consignan diferencias no significativas ($p<0,05$) por el Test de LSD.

teria orgánica, y entre la arcilla y otras partículas, promoviendo la formación de la estructura. En suelos con arcillas tipo 2:1, entre el 70 y el 90% de la CIC está saturada con Ca y/o Mg, derivando en situaciones de estructura adecuada y estable. La disminución en el contenido de bases incidiría negativamente en la arquitectura porosa del suelo y, por ende, en propiedades hídricas e hidráulicas, en la impedancia mecánica, y en procesos de densificación (Magra & Ausilio, 2004). El encalado del suelo bajo estudio, con dominio en la fracción arcilla de illita y, secundariamente, montmorillonita, promovería la formación de puentes catiónicos entre fracciones minerales y entre éstas y las orgánicas, ejerciendo un rol estructurante. En la Tabla 3 se presentan los resultados de las variables químicas evaluadas. Dada la ausencia de diferencias estadísticamente significativas de las interacciones dobles y triple de los factores principales (dosis, tipo de corrector, profundidad), se hicieron comparaciones múltiples de los mencionados factores por el test de LSD ($p<0,05$). Puede apreciarse que los tratamientos aumentaron considerablemente la CIC. A pesar de la ausencia de diferencia estadísticamente en la variable pH, posiblemente por el tiempo transcurrido desde la aplicación, existiría una tendencia de aumento del pH actual con los correctores, lo que podría explicar un incremento de la carga variable negativa de los coloides y con ellas de la CIC. Ese incre-

Tabla 3. Evolución del pH, la capacidad de intercambio catiónica (CIC), el Ca y el Mg intercambiables del suelo promedio para los factores no consignados, 2 años *a posteriori* de la aplicación de los correctores.
Table 3. Soil pH, cationic exchange capacity (CEC), interchangeable Ca and Mg evolution average for the factors non considered, 2 years later of the amendments application.

Factores	Niveles	pH H_{20} (1:2,5)	Determinaciones		
			CIC	Ca int.	Mg int.
			cmol kg^{-1}		
Dosis (kg ha^{-1})	0	5,4 a	20,77 a	15,30 a	3,10 a
	1.000	5,52 a	23,98 b	16,50 ab	3,07 a
	1.500	5,68 a	24,80 b	17,55 b	3,38 a
	2.000	5,53 a	24,45 b	17,07 ab	2,88 a
Tipo de corrector	conchilla	5,61 b	23,63 b	16,04 a	3,02 a
	dolomita	5,46 a	23,37 a	17,17 b	3,20 a

Valores en columnas seguidos de igual letra consignan diferencias no significativas ($p<0,05$) por el Test de LSD, dentro de cada factor

mento de la CIC en el marco de un aporte de Ca a través de los correctores, redundaría en un incremento del Ca intercambiable (Tabla 3), y a través de él, en el beneficio estructural antes comentado.

Cabe destacar que dosis elevadas de estos elementos podrían promover la acción cementante ejercida por sales poco solubles de los mismos, tal el caso de carbonatos de calcio y/o magnesio. Imbellone (1996) verificó procesos de disolución y recristalización de carbonato de calcio (calcáreo pedogénico), del tipo del material utilizado como enmienda en este trabajo. Condiciones de sobresaturación producidas por la dosis de 1.500 y 2.000 kg ha^{-1}, favorecerían un proceso análogo en el suelo tratado, provocando valores de resistencia a la penetración similares e, incluso, mayores a los alcanzados por Jacks & Sharma (1995) verificaron fenómenos comparables para la dolomita, tanto en sentido vertical como horizontal a lo largo del paisaje, movilizada inicialmente por disolución y arrastre de carbonatos cálcico-magnésicos. Estos resultados deben ser tenidos en cuenta para el diseño de las estrategias de tratamiento de los suelos acidificados en ámbitos templados, texturalmente finos. Mientras que dosis inferiores a los 1.500 kg ha^{-1} podrían beneficiar físicamente al suelo, las superiores podrían acarrear consecuencias mecánicas negativas para el crecimiento de las plantas. Es generalmente aceptado, que valores de resistencia a la penetración de 1,5 MPa reducirían el crecimiento de las raíces y de 2,1 MPa ó superiores lo impedirían (Threadgill, 1982). Para la profundidad de 0-10 cm, la dosis de 1.000 kg ha^{-1} de ambos productos, redujo la resistencia a la penetración con respecto a T a valores que no afectarían el crecimiento radical, según estos umbrales. La dosis de 2.000 kg ha^{-1} produjo un incremento próximo a situaciones críticas.

Los resultados de densidad aparente (Tabla 4) indican diferencia estadísticamente no significativa ($p<0,05$) entre tratamientos. Esto coincide con Alakukku (1996), quien afirma que las propiedades indicadoras de retención de agua en el suelo, tamaño y distribución de poros y resistencia a la penetración, son indicadores más sensibles que la densidad del suelo.

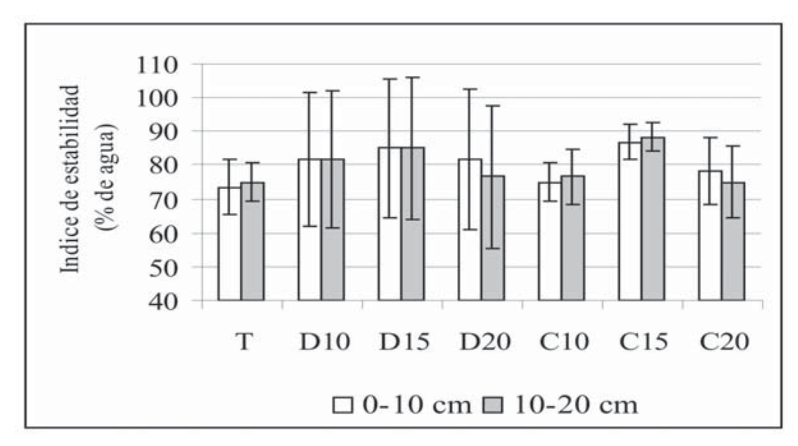
En la Figura 1 se aprecia el efecto de los productos correctores sobre la estabilidad estructural al agua, de 0-

Tabla 4. Densidad aparente según tratamientos y profundidades.

Table 4. Bulk density according to treatments and depth.

	Densidad aparente (g cm^{-3})		
	Profundidad (cm)		
Tratamientos	0-10	10-20	20-30
Testigo	1,28 a	1,17 a	1,22 a
D 10	1,28 a	1,20 a	1,24 a
D 20	1,28 a	1,18 a	1,24 a

Valores en columnas seguidos de igual letra consignan diferencias no significativas ($p<0,05$) por el Test de LSD.



Igual letra consigna diferencias no significativas ($p<0,05$) por el Test de LSD, para cada profundidad por separado. Las barras indican el desvío standart.

Figura 1. Estabilidad estructural evaluada a 2 profundidades, según tratamiento de corrección aplicado.

Figure 1. Structural stability of 2 depths, according to amendments.

10 y 10-20 cm de profundidad, respectivamente. El análisis estadístico de esta variable permite verificar un aumento significativo (p<0,05) en la dosis de 1.500 kg ha^{-1}, para ambos productos y profundidades.

La capacidad estructurante y el aumento de estabilidad estructural al agua evidenciadas, tendría repercusión en la dinámica del agua, según se aprecia en ela Figura 2. En ella puede verse que la infiltración para T (a), D10 (b) y D20 (c) presenta valores similares al inicio de la medición (10 minutos), pero, al avanzar la simulación, la infiltración se reduce en T respecto a D10, en mayor medida, y respecto a D20, en menor medida. Tales reducciones en la infiltración traen aparejados consecuentes aumentos del escurrimiento. Al finalizar la medición (60 minutos), se redujo el escurrimiento en relación a T, en 36% y 31%, para los tratamientos D10 y D20, respectivamente. Si se ajustan funciones de regresión para la totalidad de las medidas de infiltración, en función de la lámina agregada para cada tratamiento (T: y = 17,4 - 3,56 lnx, r = -0,95**; D10: y = 16,4 -2,80 lnx, r = -0,80**; D20: y = 17,3 - 3,18 lnx, r = -0,95**, siendo y: infiltración, x: lámina) y se comparan mediante ANOVA los coeficientes «b» de los distintos tratamientos, se verifican diferencia estadísticamente significativa (p <0,05) entre T y D10. Estos resultados confirmarían el efecto del agregado de las enmiendas básicas sobre las condiciones de estructuración, con un comportamiento análogo al de la resistencia mecánica, en lo que a dosis se refiere. El potencial efecto dispersante del Mg afectando la infiltración y circulación del agua citado en la literatura (Zhang & Norton, 2002; Dontsova & Norton, 2002) con el agregado de dolomita, podría ser contrarestado por la adición simultánea de Ca y la concentración electrolítica alcanzada, según Aydin *et al.* (2004), aunque los mecanismos moleculares aún no estarían claramente establecidos (Dontsova *et al.,* 2004).

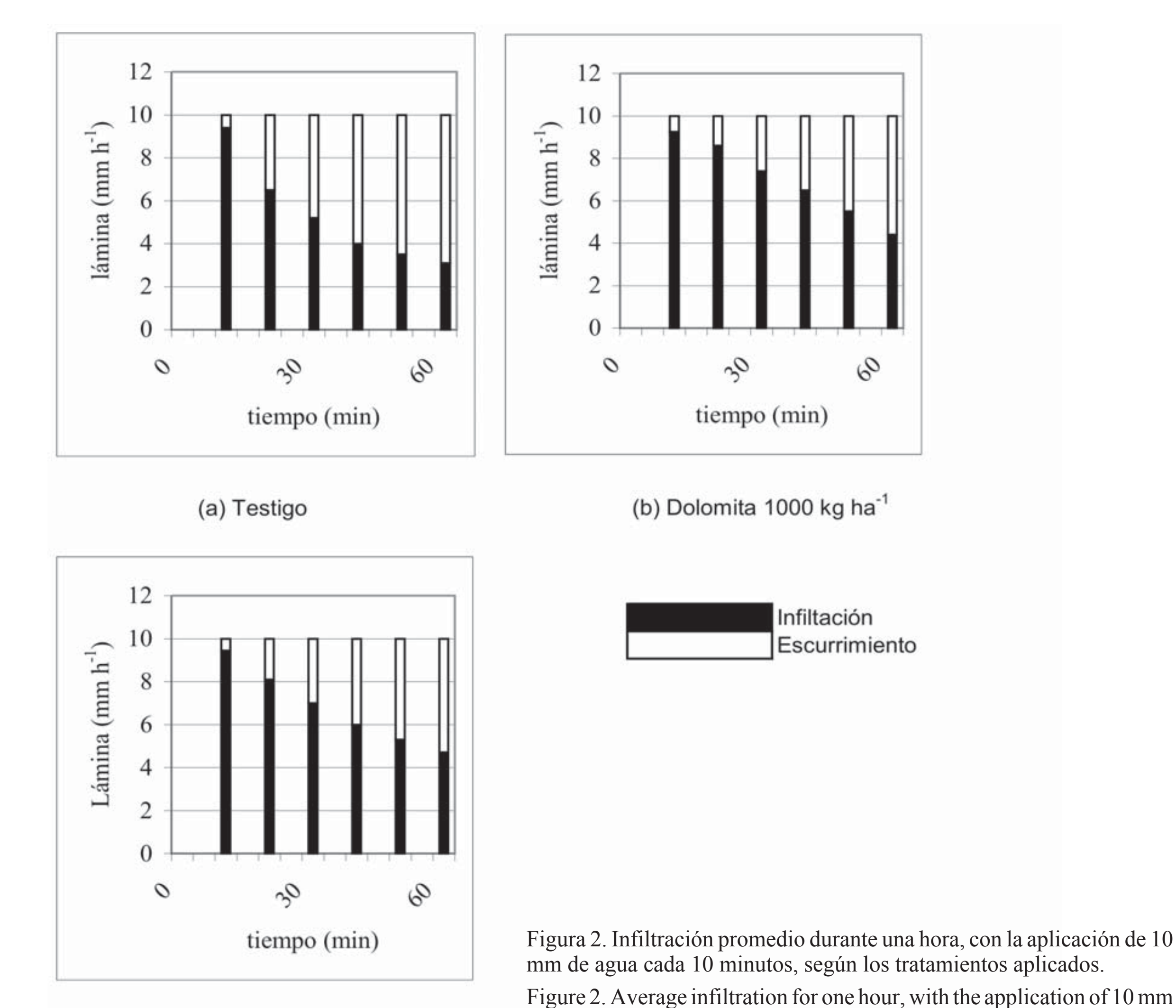


Figura 2. Infiltración promedio durante una hora, con la aplicación de 10 mm de agua cada 10 minutos, según los tratamientos aplicados.

Figure 2. Average infiltration for one hour, with the application of 10 mm of water every 10 minutes, according to the treatments.

El análisis por imagen de la porosidad (PI) permite apreciar que si bien no se observaron diferencias significativas, las capas subsuperficiales tienen tendencia a una menor porosidad estimada en ambos tratamientos (Tabla 5). De la misma manera, se observó una tendencia a valores superiores de la PI para el tratamiento D20 respeto de T. En cuanto al número de poros por cada clase de forma, puede decirse que es similar entre ambos tratamientos para los poros redondeados e irregulares, pero se observan diferencias estadísticamente significativas en los poros elongados. El análisis mostró un mayor número de poros de este tipo en la capa superficial en ambos tratamientos. El análisis estadístico de los histogramas de frecuencias de tamaños de poros (Fig. 3), permite verificar que en la mencionada capa subsuperficial existen diferencias estadísticamente significativas ($p<0,05$), lo que estaría dado por el incremento de la frecuencia de poros de menor tamaño en T, en el marco de una tendencia a una porosidad también menor.

Estos resultados podrían sugerir que las diferencias de infiltración/escurrimiento responderían no sólo a cambios en la estabilidad estructural de los agregados, como se analizó párrafos atrás, sino también, a una modificación de la distribución del tamaño de poros, conforme a lo afirmado por Lamandé *et al.* (2003), quienes usaron diagnóstico por imágenes comparables a las de este trabajo para la mencionada evaluación. Las dimensiones fractales estuvieron en el rango de las reportadas por otros autores (Anderson *et al*., 1998; Duhour *et al.,* 2004), tomando valores entre 1 y 2, por ser estimaciones realizadas sobre imágenes (Tabla 5). La dimensión fractal del sistema de poros no presentó diferencias estadísticamente significativas ($p<0,05$) ante el agregado de una dosis de 2.000 kg ha^{-1} de dolomita. Sin embargo, en los dos tratamientos analizados, presentó un menor valor en la segunda profundidad (10-20 cm), lo que indicaría un menor grado de desarrollo del espacio poroso, con poros más pequeños y discontinuos, lo que coincide con los cambios en la distribución de tamaño de poros encontrados (poros alongados). Esto ocurriría particularmente en un estrato de menor contenido de materia orgánica, en un suelo de relativamente alto contenido de arcilla, aun en los horizontes superficiales, de acuerdo a lo sugerido por Eynard *et al.* (2004), para diferentes prácticas de manejo. En la Figura 4 pueden apreciarse algunas de las imágenes de porosidad/sólidos para los diferentes tratamientos y profundidades, ilustrando los comentarios precedentes.

Los resultados obtenidos permitieron verificar que los correctores de la acidez modificaron diferentes propiedades físicas estacionarias y dinámicas de los suelos estudiados en el ámbito de la Pradera Pampeana. Sin embargo, cabe destacar que las modificaciones variaron con el producto y la dosis empleada, en este último caso de manera compleja, no siempre en sentido favorable, particularmente para la dosis más elevada. Los resultados obtenidos sentarían pautas para el manejo de los suelos acidificados de este ámbito, pero sugieren la necesidad de mayores estudios en este sentido.

CONCLUSIONES

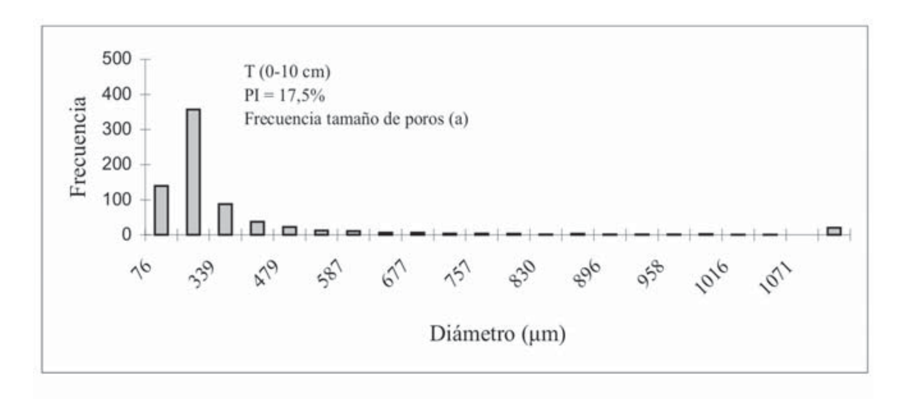
El agregado de enmiendas cálcicas y cálcico-magnésicas produjo los siguientes efectos:

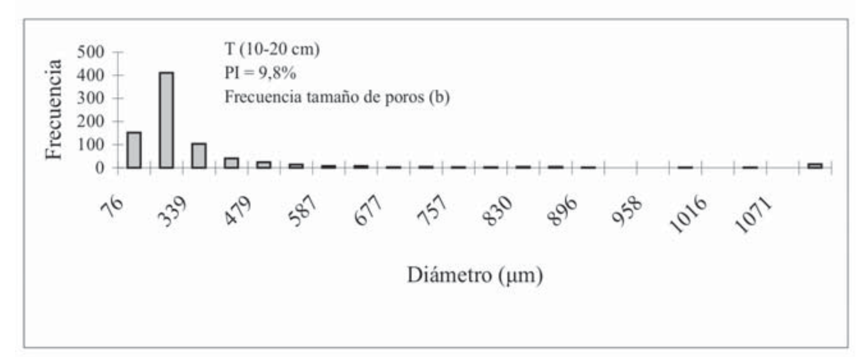
- modificó la resistencia a la penetración del suelo en forma variable, de acuerdo a la dosis de aplicación y profundidad de evaluación. Las menores dosis de correctores (1.000 kg ha^{-1}) redujeron dicha resistencia hasta los 30 cm de profundidad, respecto del suelo sin tratar y tratado con dosis superiores (1.500 y 2.000 kg ha^{-1});
- dosis medias de ambos correctores aumentaron la estabilidad de los agregados al agua;

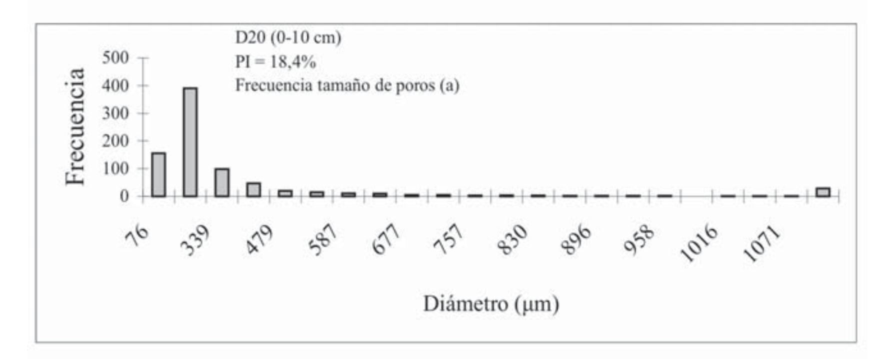
Tabla 5. Porosidad por imagen (PI), formas de poros y dimensión fractal según tratamientos y profundidad.
Table 5. Porosity by image (PI), pore shape and fractal dimension according to treatments and depth.

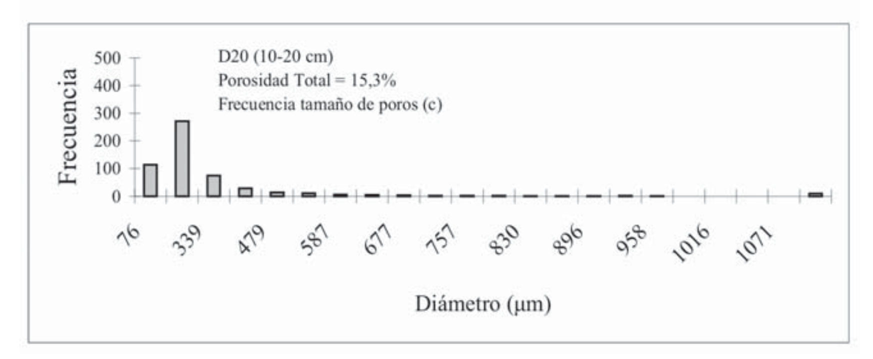
Tratamiento	Profundidad	Porosidad (PI)	Poros redondeados	Poros irregulares	Poros elongados	Dimensión fractal
	cm	%		Número		
T	0-10	17,5 a	292,5 a	84,5 a	14,2 a	1,64 a
	10-20	9,8 a	330,0 a	66,5 a	7,0 a	1,57 a
D20	0-10	18,4 a	436,2 a	131,7 a	25,5 b	1,67 a
	10-20	15,3 a	223,7 a	58,2 a	7,2 a	1,58 a

Valores en columnas seguidos de igual letra consignan diferencias no significativas ($p<0,05$) por el Test de Tukey.









Igual letra consigna diferencias no significativas ($p<0,05$) por el Test de $\times^2$.

Figura 3. Frecuencias de tamaño de poros de acuerdo al tratamiento y la profundidad (PI: porosidad por imagen; T: testigo; D20: dolomita 2.000 kg ha^{-1}).

Figure 3. Pore size frequencies according to treatment and depth (PI: porosity by image; T: control; D20: dolomite 2,000 kg ha^{-1}).

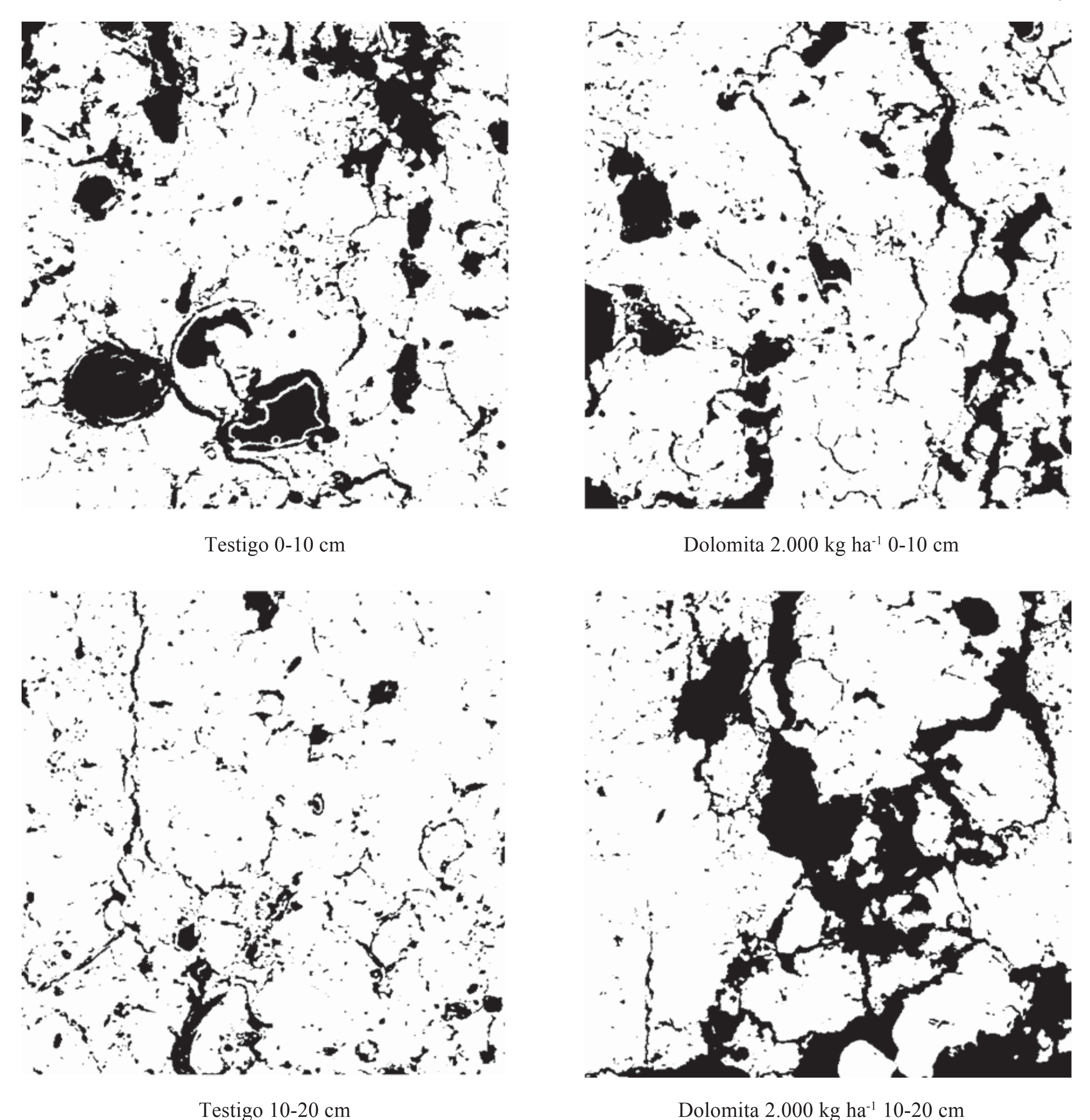


Figura 4. Imágenes de los bloques impregnados para los tratamientos Testigo y Dolomita 2.000 kg ha^{-1}, a 2 profundidades.
Figure 4. Images of the impregnated blocks of Control and Dolomite 2,000 kg ha^{-1} treatments, for 2 depths.

- la dosis de 2.000 kg ha^{-1} de dolomita incrementó la frecuencia de poros de mayor tamaño, con geometrías comparables;

- el agregado de dolomita a razón de 1.000 kg ha^{-1} aumentó la infiltración y redujo el escurrimiento, contribuyendo a la recarga del perfil y reduciendo las posibilidades de erosión;

- el agregado de dolomita no modificó la densidad aparente ni la dimensión fractal;

- los cambios en las propiedades físicas estuvieron acompañados por un incremento en la capacidad de intercambio catiónica y el Ca intercambiable con el agregado de los correctores.

BIBLIOGRAFÍA

Alakuku, L. 1996. Persistence of soil compaction due to high axle load traffic. I. Short term effects on the properties of clay and organic soils. *Soil Tillage Res.* 37: 211-222.

Alburquerque, JA; C Bayer; PR Ernani; AL Mafra & EC Fontana. 2003. Aplicação de calcário e fósforo e e estabilidade da estrutura de um solo ácido. *Rev. Brs. Ciênc. Solo* 27(5): 799-806.

Anderson, AN; AB Mc Bratney & JW Crawford. 1998. Application of fractals to soil studies. *Advances in Agronomy* Vol. 63. 76 p.

Aydin, M; T Yano & S Kilic. 2004. Dependence of Zeta Potencial and soil hydraulic conductivity on adsorbed cation and aqueous phase properties. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 68: 450-459.

Baldock, JA; M Aoyama; JM Oades; Susanto & CD Grant. 1994. Structural amelioration of South Australian Red-Brown carth using calcium and organic amendments. *Aust. J. Soil Res.* 32: 571-594.

Barone, L & S Faugno. 1996. Penetration test for measurement of soil strength: assessment of the contribution of shaft friction. *J. Agric. Res.* 64: 103-108.

Blake, GR & KH Hartge. 1986. Bulk density (Cap.13): 363-375. *In:* A Klute *(ed.)*. Methods of Soil Analysis. Part I. Physical and Mineralogical Methods. Second edition. Madison. Wisconsin, USA. 1173 pp.

Blake, L; KW Goulding; CJB Mott & AE Johnston. 1999. Changes in soil chemistry accompanying acidification over more than 100 years under woodlandgrass at Rothamsted Experimental Station, UK. *Eur. J. Soil Sci.* 50: 401-412.

Chan KY & DP Heenan. 1998. Effect of lime ($CaCO_3$) application on soil structural stability of a red carth. *Aus. J. Soil Res.* 36: 73-86.

Chen, Z; S Pawluk & NG Juma. 1998. Impact of variations in granular structures on carbon sequestration in two Alberta Mollisols. p. 225-243. *In:* R Lal *et al. (ed.)* Soil Processes and Decarbon Cycle. ADV. Soil Sci. CRC Press, Boca Raton. FL.

Dontsova, KM & LD Norton. 2002. Clay dispersión, infiltration, and erosion as influenced by exchangeable Ca and Mg. *Soil Sci.* 167: 184-193.

Dontsova, KM; L Darrell Norton; CT Johnston & JM Bigham. 2004. Influence of exchnageable cations on water adsorption by soil clays. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 68: 1218-1227.

Duhour, A; C Costa; F Momo & L Falco. 2004. Estructura fractal del suelo bajo distintos sistemas de manejo. *Ciencia del Suelo* 22(1): 36-39

Eynard, A; TE Schumacher; MJ Lindstrom & DD Malo. 2004. Porosity and pore-size distribution in cultivated Ustolls and Usterts. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 68: 1927-1934.

Fitzpatrick, EA. 1984. Micromorphology of soils. Cambridge. University Press. 433 pp.

Imbellone, PA. 1996. Redistribución de carbonato de calcio en sucesiones cuaternarias de la llanura costera bonaerense. *Asociación Argentina de Sedimentología* 3(2): 63-76.

Irurtia C & R Mon. 1994. Microsimulador de lluvia para determinar infiltración a campo. Publicación Nº 176. Instituto de Suelos, EEA Castelar, INTA 18pp.

Jacks, G & VP Sharma. 1995. Geochemistry of calcic horizons in relation to hillslope processes, southern India. *Geoderma* 67: 203-214.

Lamandé, M; V Hallaire; P Curmi; G Péres & D Cluzeau. 2003. Changes of pore morphology, infiltration and earthworm community in loamy soil under different agricultural managements. *Catena* 54: 637-649.

Lanfranco, J. 1980. Carta de Suelos de la Estación Experimental J Hirtschhonn, FCAyF/UNLP. inédito. 15 p.

Magra, G & A Ausilio. 2004. Revista Agromensajes de la Facultad de Ciencias Agrarias de la Universidad Nacional de Rosario, Agosto, 5pp.

Mendenhall, W; R Scheaffer & D Wackerly. 1986. Estadística matemática con aplicaciones. *Ed.* Grupo Editorial Iberoamericana, California, USA. 751pp

Posadas, AN; D Giménez; R Quiroz & R Protz. 2003, Multifractal Characterization of Soil Pore Systems. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 67: 1361-1369.

Roth, CH & MA Pavan. 1991. Effects of lime and gypsum on clay dispertion and infiltration in samples of a brazilian Oxisolls. *Geoderma* 48: 351-361.

SAGPyA (Secretaría de Agricultura, Ganadería, Pesca y Alimentación de la Nación Argentina). Dirección de Producción Agrícola. 2004. Sistema de Apoyo Metodológico a los Laboratorios de Análisis de Suelos (SAMLA). CD-room. ISBN 987-9184-40-8.

Tallarico, L. 1974. El método rápido de la mezcla alcohol: agua para evaluar la estructura del suelo. *IDIA* 1-4: 313-314.

Threadgill, ED**.** 1982. Residual tillage effects as determined by cone index. *Transaction of the ASAE* 25(4): 859-963.

Tisdall, JM & JM Oades. 1982. Organic matter and water stable aggregates in soils. *J. Soil Sci.* 33: 141-163.

Vázquez, M; P Gelati & D Santos. 2005. Efecto del agregado de calcio y magnesio sobre el complejo de cambio de un Argiudol Típico y su relación con el rendimiento de alfalfa. Actas Simposio Uruguayo-Argentino Impacto de la Intensificación Agrícola en el Recurso Suelo. Versión Electrónica. 6 y 7 /10. Colonia. Uruguay.

Vázquez, M. 2005. Calcio y Magnesio del suelo. Encalado y enyesado. Cap. 8: 161-185. *En:* Fertilidad de suelos y fertilización de cultivos. Echeverría, H & García, F *(eds.)*. INTA, Buenos Aires, Argentina. 525 p.

Zhang, XC & LD Norton. 2002. Effect of exchangeable Mg on saturated hydraulic conductivity, disaggregation and clay dispersion of disturbed soils. *J. Hidrol*. 260: 194-205.